

## AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLİ VE VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİLİ YAPILARDA KARMA BİR PASİF KONTROL UYGULAMASI

Hüseyin ÇETİN<sup>1</sup>, Ersin AYDIN<sup>1</sup> ve Baki Öztürk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde

<sup>2</sup> Hacettepe Üniversitesi, Ankara

### ABSTRACT

In recent years, the passive systems developed for the structural design have been seen to have extinguished earthquake and wind energies by themselves. It is known that particularly tuned mass dampers (TMD) are more effective against wind effects, and perform well in viscous dampers (VD) in earthquakes. This study focuses on the optimal use of these two different passive damping systems together. A hybrid system with both a set mass damper and a set viscous damper is aimed. An optimal damper distribution was investigated in a shear frame with two set mass dampers, one at the top, the other at the intermediate storey, and viscous dampers at the floors. The damping and stiffness coefficients of the mass dampers set in the optimization problem are optimized under the 3% TMD mass ratio. In the optimization of TMD parameters, the empirical equations given in literature are used. The targeted rate of relative displacement between floors is the allowable level. In the optimization algorithm used, while the relative displacements between the floors are kept at a certain level, a target damping ratio is also reached. As a result, this mixed passive control system has been effective in reducing viscous damper quantity as well as effectively reducing displacements and inter-storey drifts.

### ÖZET

Son yıllarda depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunda geliştirilen pasif sistemlerin tek başlarına yapılarda, deprem ve rüzgâr enerjilerini sönmledikleri görülmüştür. Özellikle ayarlı kütle sönmleyicilerin (TMD) rüzgâr etkilerine karşı daha etkili oldukları, viskoz sönmleyicilerinde (VD) depremlerde iyi performans sergiledikleri bilinmektedir. Bu çalışma, bu iki farklı pasif sönmleyici sisteminin bir arada en uygun kullanımına odaklanmıştır. Hem ayarlı kütle sönmleyicilerin hem de viskoz sönmleyicilerin olduğu karma bir sistem amaçlanmıştır. Biri tepe de, diğeri bir ara katta olmak üzere iki tane ayarlı kütle sönmleyiciye ve katlarda viskoz sönmleyicilere sahip bir kayma çerçevesinde, optimum sönmleyici dağılımı araştırılmıştır. Optimizasyon probleminde ayarlı kütle sönmleyicilerin sönm ve rijitlik katsayısı %3 TMD kütle oranı altında optimize edilmiştir. TMD parametrelerinin optimizasyonunda literatürde verilen ampirik denklemler kullanılmıştır. Çalışmada hedeflenen, katlar arası rölatif deplasman oranının izin verilebilir seviyede olmasıdır. Kullanılan optimizasyon algoritmasında katlar arası göreceli deplasmanlar belli seviyede tutulurken, bir hedef sönm oranına da ulaşılmaktadır. Sonuç olarak bu karma pasif kontrol sistemi hem eklenen sönmleyici miktarını, hem de kat deplasman ve katlar arası rölatif deplasmanı azaltmaktadır.

## GİRİŞ

Deprem ve rüzgâr gibi dinamik etkilerin sebep olduğu titreşimlere karşı yapıların kontrolü için farklı yollar izlenebilir. Literatürde son dönemlerde optimal sönümleyici konsepti yaygın olarak çalışılmaktadır [1-7]. Takewaki [8] sismik dayanımın pasif kontrol elamanları ile sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Genel olarak çalışmalarında gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerini kullanmıştır, fakat optimizasyon probleminde birden çok amaç fonksiyonu ve birden çok kısıt varsa nümerik çözümde zorluklar görülebilmektedir. Bu sebeple gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinden ziyade direk arama optimizasyon tekniklerinin kullanımı daha uygun olacaktır [9]. Ayrıca direk arama metodları türev gibi matematiksel gereksinimlere de ihtiyaç duymazlar. Bir takım araştırmacılar [10,11] ise optimal sönümleyici problemlerini çözmek için meta sezgisel algoritmalara dayalı çalışmalar ortaya koymuşlardır.

Ayarlı Kütle sönümleyicileri (TMDs) kütle, yay ve bir sönümleyiciden oluşan sistemlerdir. Kullanım amaçları yapıdaki zararlı titreşim etkilerini azaltmaktır. TMD'ler ana kütle ile ters fazda hareket ederek atalet kuvvetleri sayesinde enerjiyi sönümlemektedir. Pasif ayarlı kütle sönümleyicileri genellikle yapının spesifik bir moduna ve özellikle de 1. moduna ayarlanırlar [12-15]. TMD'ler yapının en üst katına yerleştirildiklerinde genellikle daha etkindirler [16-18]. Ayarlı kütle sönümleyicileri sistemin histerik sönümlenen enerjisinin miktarını azaltmaktadır. Sistemindeki sönümlenen bu enerjinin miktarı yapının hasar görmesi ile direk ilişkilidir. Bu sebeple, dinamik etkiler altındaki lineer olmayan yapıların korunmasında TMD'ler etkili olacaktır [19-22]. Ayrıca doğru bir şekilde tasarlanırlarsa hem yapısal hem de yapısal olmayan deprem hasarlarını azaltabilirler [23,24], böylece hem rüzgâr hem de deprem etkilerini düşürmede etkin bir şekilde kullanılabilirler.

## ALAN DENKLEMLERİ ve FORMÜLASYON

$[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  sırası ile kütle, yapısal sönüm ve rijitlik matrisi,  $[C]_d$  ve  $[K]_d$  ise sırasıyla TMD'lerin sönüm ve rijitlik matrisi,  $\{\phi\}$  normalize edilmiş 1.mod vektörü,  $\omega_1$  ifadesi yapı modelinin sönümsüz doğal dairesel frekansı,  $[C_{ad}]$  amaç fonksiyonu minimize edilerek tasarlanan ilave edilen sönüm matrisi,  $\zeta_1$  sönümleyiciler eklendikten sonraki sönüm oranı,  $\zeta_s$  1. mod frekansı için yapısal sönüm oranı,  $\zeta_{ad}$  1. mod için eklenen sönüm oranı olmak yapıya ilave edilecek sönüm oranı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\zeta_{ad} = \zeta_1 - \zeta_s \quad (1)$$

$c_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) ifadesi i. eklenen sönümün sönüm katsayısı ile ilişkili katsayı,  $[C_i]$  ( $i = 1, \dots, n$ ) i. eklenen sönüm matrisinin lokasyon matrisi olmak üzere, lokasyon matrisi aynı zamanda  $[C_{ad}]$ 'in i. eklenen sönüm katsayısına göre kısmi türevine eşittir, şöyle ki:

$$[C_i] = \frac{\partial [C_{ad}]}{\partial c_i} \quad (2)$$

Ayrıca :

$$2\zeta_{ad}\omega_1 = \frac{\{\phi_1\}^T ([C_{ad}]) \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} = c_1 \frac{\{\phi_1\}^T ([C_1]) \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} + c_2 \frac{\{\phi_1\}^T ([C_2]) \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} + \dots + c_n \frac{\{\phi_1\}^T ([C_n]) \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} \quad (3)$$

Şeklinde yazılabilir.  $c_i$  ' nin katsayılarının çarpıldığı ifade  $\mu_i$  şu şekilde yazılabilir:

$$\mu_i = \frac{\{\phi_1\}^T ([C_i]) \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} \quad (4)$$

1. mod için eklenmek istenen sönüm oranı  $\zeta_{ad}$  için:

$$\zeta_{ad} = \frac{1}{2\omega_1} (\mu_1 c_1 + \mu_2 c_2 + \dots + \mu_n c_n) = \frac{1}{2\omega_1} \sum_i^n \mu_i c_i \quad (5)$$

Optimal sönümleyici tasarımı için birtakım yönetmelikler ve yöntemler mevcuttur. Örneğin toplam sönüm için bir NEHRP [25] kullanılabilir. Sönüm oranının tanımlanması için diğer bir yol ise lineer elastik bölgede değerin hesaplanmasıdır [26]. Arzu edilen sönüm oranının toplamı, eklenen toplam sönüm miktarıyla orantılı sönüm katsayısına dönüştürülebilir.

Eğer yapıya yerleştirilen MTMD ( Çoklu Ayarlı Kütle sönümleyicisi) 1. modun kontrolüne göre tasarlanacaksa,  $M_1$  1. moda ait modal kütle ,  $K_1$  1. moda ait modal rijitlik olmak üzere:

$$M_1 = \phi_{1n}^T * \mathbf{m} * \phi_{1n} \quad (6)$$

$$K_1 = \omega_1^2 M_1 \quad (7)$$

Burada  $\mathbf{m}$  yapının kütle matrisi,  $\phi_1$  ise yapının 1. moduna ait öz vektörünü ifade etmektedir. 1.

Mod vektörüne göre tanımlanmış modal kütle  $\tilde{M}$  şu şekilde hesaplanır.

$$\tilde{M} = (1/\phi_{1n}^2) M_1 \quad (8)$$

modal kütle oranı ifadesi ise şu şekildedir:

$$\mu = \frac{m_d}{\tilde{M}} \quad (9)$$

Burada  $m_d$  ifadesi TMD'nin kütlesini ifade eder.

Nam Hoang ve diğerleri [27] TMD'nin deprem altındaki tasarımı ve davranışı için bazı pratik formüller ortaya koymuşlardır. Bu denklemde  $\omega_g$  karakteristik yer frekansı,  $\zeta_g$  ise karakteristik yer sönüm orandır.

Yer frekansı:

$$\lambda = \omega_g / \omega_s \quad (10)$$

Ayar frekansı:

$$\gamma = \omega_d / \omega_s \quad (11)$$

Yer frekansı  $\lambda$  'nin belirli aralıkları için, TMD 'nin  $\gamma^{opt}$  ayar frekansı ve sönüm oranı  $\xi_d^{opt}$  değerleri şu şekilde hesaplanır [27] :

$\lambda = 1$  için:

$$\gamma^{opt} = \frac{\sqrt{(1-0.6\mu)(1+\mu^2)}}{1+\mu} - 0.7\xi_s \quad (12)$$

$$\xi_d^{opt} = \frac{\sqrt{\mu(1+2.5\mu+2\mu^2)}}{2(1+2.7\mu)} - 0.7\xi_s \quad (13)$$

$1 < \lambda < 3$  için:

$$\gamma^{opt} = \frac{\sqrt{1-\lambda\mu/6}}{1+\mu} - \frac{0.7\xi_s}{1-\mu/2} \quad (14)$$

$$\xi_d^{opt} = \frac{\sqrt{\mu(1-\mu/4)}}{4(1+\mu)(1-\mu/2)} - 0.25\mu\xi_s \quad (15)$$

$\lambda \geq 3$  için:

$$\gamma^{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} - \frac{0.7\xi_s}{1-\mu/2} \quad (16)$$

$$\xi_d^{opt} = \frac{\sqrt{\mu^2(1-\mu/4)}}{4(1+\mu)(1-\mu/2)} - 0.25\mu\xi_s \quad (17)$$

Burada  $\xi$  ifadesi yapının sönüm oranını ifade etmektedir.  $\omega_d$  TMD frekansı olmak üzere optimum TMD'nin sönüm ve rijitlik parametreleri şu şekildedir:

$$k_{dopt} = \omega^2 M_1 = k_d = m_d \omega_d^2 = \mu k \gamma_{opt}^2 \quad (18)$$

$$c_{dopt} = 2\xi_{dopt} \omega_d m_d \quad (19)$$

Burada  $c_{dopt}$  TMD'nin sönüm katsayısının optimum değeridir.  $k_{dopt}$  ifadesin de TMD'nin optimum yay rijitliğidir.

## SAYISAL ÖRNEK

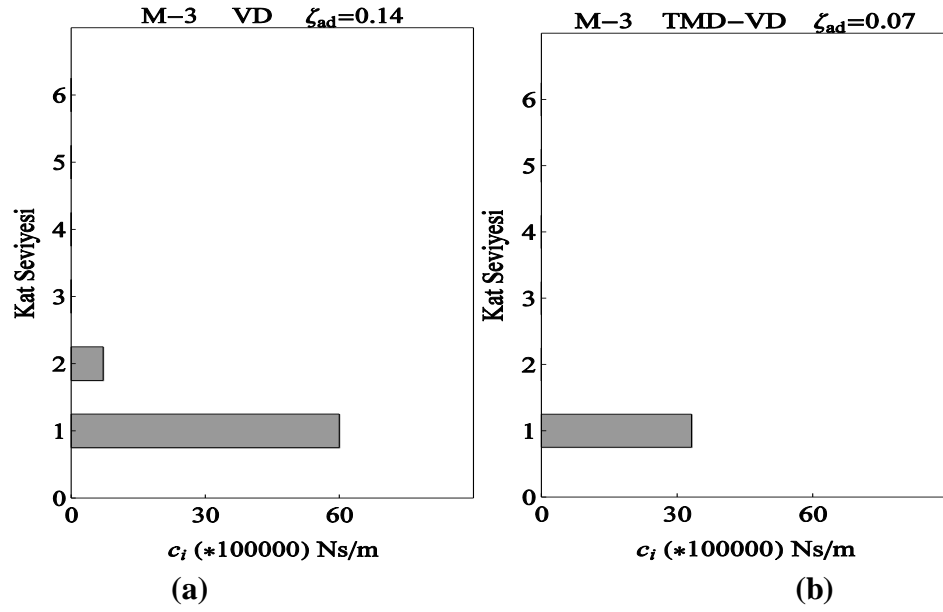
Bu çalışmada altı katlı kesme çerçevesinde sönüm optimizasyonu ve yerleşimi yapıldıktan sonra yapı modelinin birinci ve altıncı katına TMD yerleştirilmiştir. TMD'lerin en üst kata yerleştirilip de 1. mod doğal frekansına ayarlandıklarında daha etkili oldukları bilinmektedir [14,15]. Yapıların bodrumları en alt katta olduğu için uygulama kolaylığı açısından, 2. modun kontrolü yapabilmek amacıyla diğer TMD birinci kata yerleştirilmiştir. TMD parametrelerinin optimizasyonu için Nam Hoang ve diğerleri [27] ortaya koymuş oldukları bazı pratik formasyonlar kullanılmıştır. Her bir katın kütlesi eşit ve  $12.0 \times 10^4$  kg ve her bir katın rijitliği  $2.5 \times 10^7$  N/m'dir Her bir katın kütlesinin eşit olması durumu M-3 durumu olarak tanımlanmıştır. 1. mod için yapısal sönüm 0.02 varsayılacak ve sönüm matrisinin kütle matrisi ile orantılı olacaktır. El-Centro(NS) (1940) deprem kaydı tasarım depremi olarak seçilerek eklenen hedef sönüm oranı ilk iterasyonda 0.01 olarak alınmış her iterasyonda %1 değerinde adım adım artırılmıştır. Optimal tasarım katlar arası rölatif deplasman % *IDR* 'ye göre test edilmiştir. Sönüm optimizasyonu için mathematica 8.0'deki (Wolfram Research 2012) Simulated Annealing metodu optimizasyon modülü kullanılmıştır % *IDR* 'lerin bütün pik değerleri belli bir itersayondan sonra izin verilen değer altına düşürülmüştür Optimal tasarım için  $\bar{c}_i = 6.0 \times 10^6$  Ns/m değerine ulaşmaktadır. Sönümleyicilerin belirtilen katlara optimal yerleştirilmesi her kata yerleştirilmesine göre işçilik maliyetini önemli ölçüde azaltacaktır (Aydın,2013).

Altıncı kattaki TMD, 1. mod doğal frekansını kontrol etmek için tasarlanmış olup 1. mod doğal frekansı  $\omega_1 = 3.48$  rad/sn, kütle oranı %3 için  $m_d = 21600$  kg'dır. 1. Moda ait modal kütle  $M_1 = 395750$  kg, modal kütle oranı  $\mu = 0.055$ , ayar frekansı  $\gamma^{opt} = 0.92$ , frekans oranı  $\lambda = 3.448$ , TMD sönüm oranı  $\zeta_d = 0.115$ , TMD sönüm miktarı  $c_d = 148926$  Ns/m, TMD rijitlik miktarı  $k_d = 22150$  KN/m olarak hesap edilmiştir.

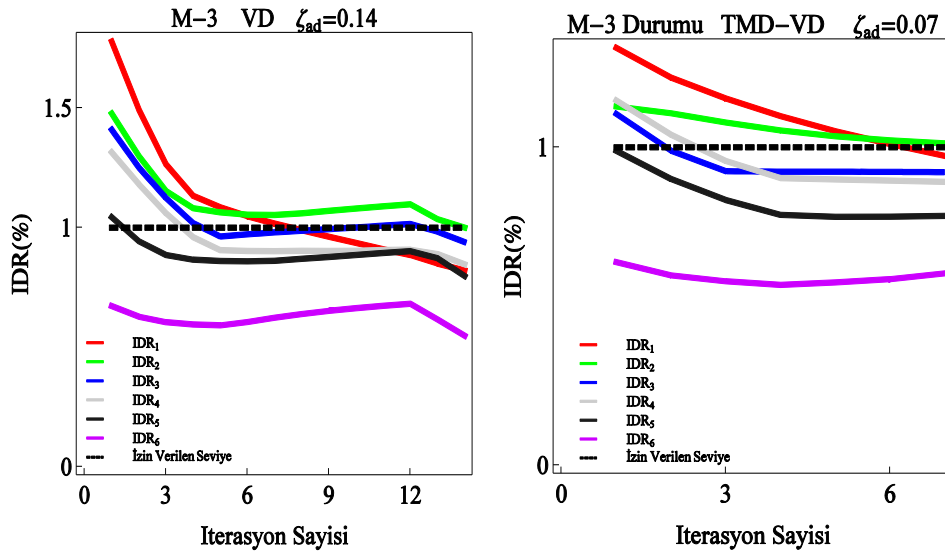
Birinci kattaki TMD, 2. mod doğal frekansını kontrol etmek için tasarlanmış olup 2. mod doğal frekansı  $\omega_2 = 10.24$  rad/sn, kütle oranı %3 için  $m_d = 21600$  kg'dır. 2. Moda ait modal kütle  $M_2 = 395750$  kg, modal kütle oranı  $\mu = 0.055$ , ayar frekansı  $\gamma^{opt} = 0.918$ , frekans oranı  $\lambda = 1.17$ , TMD sönüm oranı  $\zeta_d = 0.115$ , TMD sönüm miktarı  $c_d = 466392$  Ns/m, TMD rijitlik miktarı  $k_d = 1.9 \times 10^6$  KN/m olarak hesap edilmiştir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi sadece viskoz sönümleyici VD eklenmiş yapıda katlar arası rölatif deplasman oranını (% *IDR*) %1 in altına indirebilmek yapının 1. Katına ve 2.katına sönümleyici eklenmiştir. TMD-VD durumunda % *IDR* 'yi % 1'in altına düşürmek amacıyla 1. kata belli miktarda sönümleyici eklemek yeterli olmuştur. Buradan da anlaşılaacağı üzere yapıya TMD eklenmesi ihtiyaç duyulan sönümleyici miktarını azaltmaktadır.

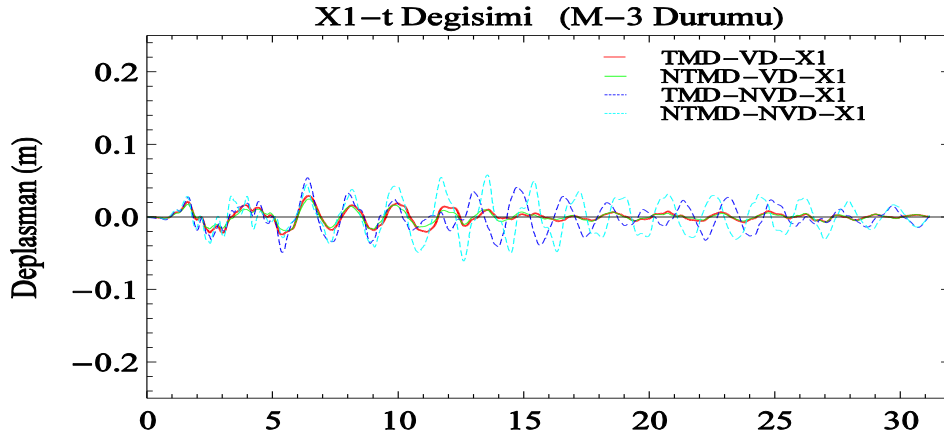
Şekil 2'de görüldüğü gibi M-3 durumu için, katlar arası rölatif deplasmanların oranlarının (% *IDR*) iterasyon sayısına göre VD veya TMD-VD eklenmiş durumları için değişimi görülmektedir. Grafiklerden de anlaşılaacağı üzere % *IDR* 'ler %1'in altına, VD 'li sistemde %11 sönüm oranı artışı ile 11 iterasyonda, TMD-VD 'li sistemde ise %7 sönüm oranı artışı ile 7 iterasyonda düşürülebilmektedir. Burada yine TMD'nin sisteme eklenmesinin ihtiyaç duyulan sönüm oranını azalttığı sonucuna varılabilir.



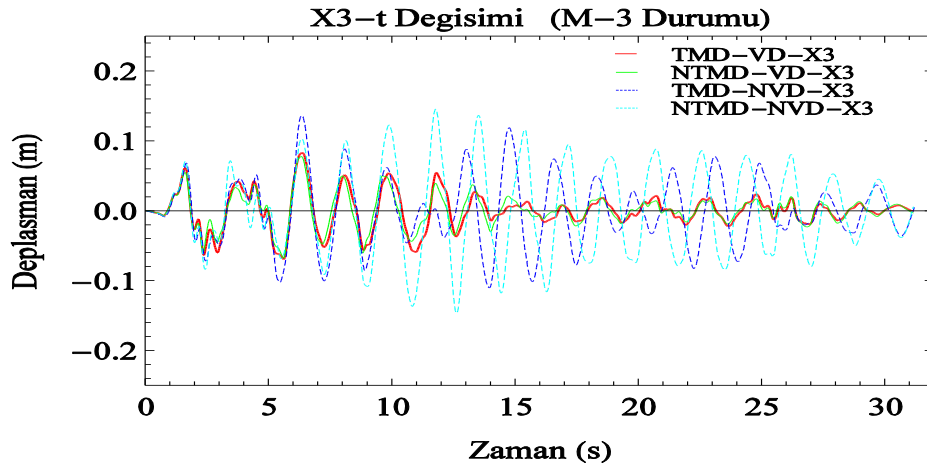
Şekil 1. (a) TMD'nin olmadığı yapıda viskoz sönümleyicinin miktarı ve katlardaki dağılımı  
(b) TMD'nin olduğu yapıda viskoz sönümleyicinin miktarı ve katlardaki dağılımı



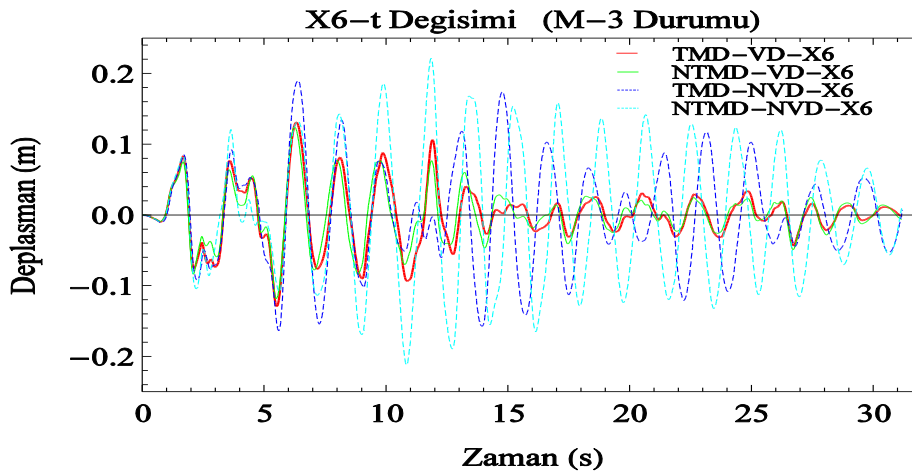
Şekil 2 (a) TMD'nin olmadığı ve yapıda viskoz sönümleyicinin (VD) olduğu durum için % IDR'nin %1 in altına düşürülmesi ve iterasyon sayısı (b) TMD ve viskoz sönümleyicinin (VD) olduğu durum için % IDR'nin %1 in altına düşürülmesi ve iterasyon sayısı



(a) 1. Kat yer değıştirmesi

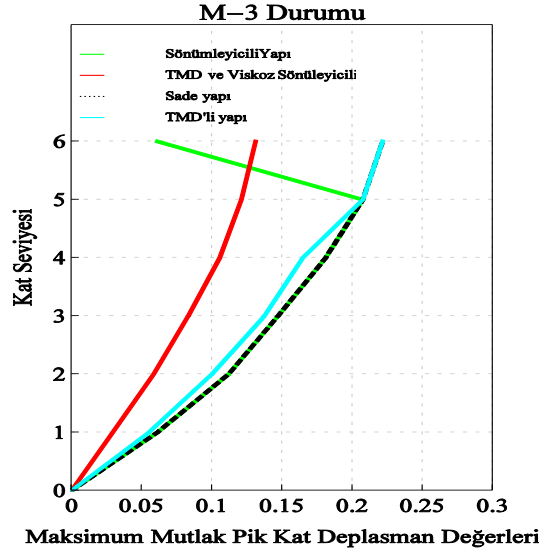


(b) 3. Kat yer değıştirmesi



(c) 6. Kat yer değıştirmesi

Şekil 3. Yapı modelinde 1. kat, 3. kat ve 6. kat deplasmanlarının sade yapı, sönümleyicili (VD) yapı, yalnızca TMD'li yapı ve hem TMD''li hem de VD'li yapı için zamana göre değışimi



Şekil 4. Yapı modelinde mutlak pik kat deplasmanlarının, sade yapı, sönümleyicili (VD) yapı, yalnızca TMD'li yapı ve hem TMD'li hem de VD'li yapı için katlara göre değişimi

Şekil 3'de görüldüğü gibi, yapı modelinde 1. kat, 3. kat ve 6. kat deplasmanlarının sade yapı, sönümleyicili (VD) yapı, yalnızca TMD'li yapı ve hem TMD'li hem de VD'li yapı için zamana göre değişimi görülmektedir. Yapıya VD eklenmesi kat deplasmanlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Yapıya TMD-VD eklenmesi ise kat deplasmanlarını VD eklenmiş duruma göre daha da iyi azaltmıştır. Yapıya sadece TMD eklenmesi ise deplasmanları belli ölçüde azaltabilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü üzere, yapı modelinde pik mutlak deplasmanların katlara göre değişimi sade yapı, sönümleyicili (VD) yapı, yalnızca TMD'li yapı ve hem TMD'li hem de VD'li yapı için görülmektedir. Yapıya VD eklenmesi pik mutlak kat deplasmanlarını belli ölçüde azaltmıştır. Yapıya TMD-VD eklenmesi ise kat pik mutlak kat deplasmanlarını ciddi bir şekilde azaltmıştır. Yapıya sadece TMD eklenmesi ise pik mutlak deplasmanlarını belli ölçüde azaltabilmiştir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada altı katlı kesme çerçevesinde sönüm optimizasyonu ve yerleşimi yapıldıktan sonra yapı modelinin birinci ve altıncı katına TMD yerleştirilmiştir. Önce sönümleyicisiz yapı, daha sonra, ayrı ayrı %3 kütle oranına sahip olan TMD 1. kata ve 6. kata yerleştirilmiştir. 6. Kata yerleştirilen TMD 1. moda göre, 1. Kata yerleştirilen TMD ise 2. moda göre optimize edilmiştir. Sade yapı, TMD'li yapı, TMD ve VD'li yapı El Centro (NS) depremi etkisi altında analiz edilerek, sonuçlar sönümleyici dağılımı, % *IDR*'nin sönüm oranına göre değişimi, kat deplasmanlarının zamana göre değişimi, pik mutlak deplasmanlarının katlara göre değişimi incelenmiştir. Bu çalışma neticesinde bulunan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Sadece viskoz sönümleyici VD eklenmiş yapıda katlar arası rölatif deplasman oranını (% *IDR*) %1'in altına indirebilmek yapının 1. katına ve 2. katına sönümleyici eklenmiştir. TMD-VD durumunda % *IDR*'yi %1'in altına düşürmek için 1. kata belli miktarda sönümleyici eklemek yeterli olmuştur. Buradan da anlaşılacağı üzere yapıya TMD eklenmesi ihtiyaç duyulan sönümleyici miktarını azaltmaktadır.
- 2) Katlar arası rölatif deplasmanların oranlarının (% *IDR*) iterasyon sayısına göre VD veya TMD-VD eklenmiş durumları için % *IDR*'ler %1'in altına VD'li sistemde %11 sönüm oranı artışı ile 11 iterasyonda, TMD-VD'li sistemde ise %7 sönüm oranı



artışı ile bir 7 iterasyonda düşürülmüştür. Buradan TMD'nin sisteme eklenmesinin ihtiyaç duyulan sönüm oranını azalttığı sonucuna varılabilir.

- 3) Yapı modelinde 1. kat, 3. kat ve 6. kat deplasmanlarının sade yapı, sönümleyicili (VD) yapı, yalnızca TMD'li yapı ve hem TMD'li hem de VD'li yapı için zamana göre incelenmiştir Yapıya VD eklenmesi kat deplasmanlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Yapıya TMD-VD eklenmesi ise kat deplasmanlarını VD eklenmiş duruma göre daha da iyi azaltmıştır. Yapıya sadece TMD eklenmesi ise deplasmanları belli ölçüde azaltabilmiştir. Sonuç olarak TMD-VD kullanımı zamana göre değişen kat deplasmanlarını etkili bir şekilde azaltmıştır.
- 4) Yapı modelinde pik mutlak deplasmanların katlara göre değişimi sade yapı, sönümleyicili (VD) yapı, yalnızca TMD'li yapı ve hem TMD'li hem de VD'li yapı için incelenmiştir. Yapıya VD eklenmesi pik mutlak kat deplasmanlarını belli ölçüde azaltmıştır. Yapıya TMD-VD eklenmesi ise pik mutlak kat deplasmanlarını ciddi bir şekilde azaltmıştır Yapıya sadece TMD eklenmesi ise pik mutlak deplasmanlarını belli ölçüde azaltabilmiştir. Sonuç olarak TMD-VD kullanımı pik mutlak deplasmanlarını her katta önemli ölçüde azaltmıştır.

### KAYNAKLAR

- [1] M.C. Constantinou, I.G. Tadjbakhsh, , Optimum design of a first storey damping, *Computer & Structures*, 17 (1983), 305-310. doi:10.1016/0045-7949(83)90019-6.
- [2] G.D. Hahn, K.R. Sathiyageeswara, Effects of added-damper distribution on the seismic response of building, *Computer & Structures*, 43 (1992), 941-950. doi:10.1016/0045-7949(92)90308-M.
- [3] R.H. Zhang, T.T Soong, Seismic design of visco-elastic dampers for structural applications, *Struct Eng ASCE*, 118 (1992), 1375-1392. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:5(1375).
- [4] M. Gürgöze, P.C. Müller, Optimum position of dampers in multi body systems, *J. Sound Vib.*, 158 (1992), 517-530. doi:10.1016/0022-460X(92)90422-T
- [5] X. Cao, H.P. Mlejek, Computational prediction and redesign for visco-elastically damped structures, *Comput Methods Appl Mech Engng*, 125 (1995), 1-16. doi: 10.1016/0045-7825(95)00798-6.
- [6] M. Tsuji, T. Nakamura, Optimum viscous dampers for stiffness design of shear buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*, 5 (1996), 217-234. doi: 10.1002/(SICI)1099-1794(199609)5:3<217AID-TAL70>3.0.CO;2-R.
- [7] A.K. Shukla, T.K. Datta, Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force, *J of Struct Eng*, 125 (1999), 401-409. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:4(401).
- [8] I. Takewaki, Building control with passive dampers: Optimal performance-based design for earthquakes, *John Wiley & Sons Ltd. (Asia)*, Singapore, 2009.
- [9] B. Champion, A. Strzebonski, Constrained optimization, *Wolfram Mathematica Tutorial Collection*, 2008.
- [10] J.A.Bishop, A.G. Striz, On using genetic algorithms for optimum damper placement in space trusses, *Struct Mult-Disp Optim*, 28(2004), 136-145. doi.org/10.1007/s00158-004-0441-9.
- [11] O. Lavan, G.F. Dargush, Multi-objective optimal seismic retrofitting of structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 13(2009), 758-790, doi: 10.1080/13632460802598545
- [12] J.P. Den Hartog, Mechanical Vibrations. *New York: 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill*. 1956.
- [13] K.C. Falcon, B.J. Stone, W.D. Simcock, C. Andrew, Optimization of vibration absorbers: a graphical method for use on idealized systems with restricted damping,

- Journal of Mechanical Engineering Science*, 9 (1967), 374-381, doi:10.1243/JMES\_JOUR\_1967\_009\_058\_02.
- [14] T. Ioi, K. Ikeda, On the damped absorber of the dynamic vibration system, *Bulletin of Japanese Society of mechanical Engineering*, 21 (1978), 64-71, doi:0.1299/jsme1958.21.64.
- [15] G.B. Warburton, E.O. Ayorinde, Optimum absorber parameters for simple systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 8 (1980), 197-217, doi: 10.1002/eqe.4290080302.
- [16] R. Villaverde, L.A. Koyama, Damped resonant appendages to increase inherent damping in buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 22 (1993), 491-507, doi:10.1002/eqe.4290220603.
- [17] R. Soto-Birito, S.E. Ruiz, Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 28 (1999), 1255-1271, doi:10.1002/(SICI)1096-9845(199911)28:11<1255:AID-EQE865>3.0.CO;2-C
- [18] J.J. Connor, B.S.A Klink Introduction To Structural Motion Contro. New York: Prentice Hall Pearson Education, Inc., (2000).
- [19] Pinkaew, T., P. Lukkunaprasit, and P. Chatupote, (2003), “Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures”, *Engineering Structures*. 25, 39-46, doi: 10.1016/S0141-0296(02)00115-3
- [20] Lee, C.L., Y.T. Chen, L.L. Chung, and Y.P. Wang, Optimal design theories and applications of tuned mass dampers, *Engineering Structures*, 28, 43-53, 2006, doi:10.1016/j.engstruct.2005.06.023.
- [21] C.Christopoulos, A. Filiatrault, Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. *University of Pavia, IUSS Press*, 2006.
- [22] S.Sgobba, G.C. Marano, “Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behavior.”, *Mechanical System and Signal Processing*, 24 (2010), 1739-1755, doi:10.1016/j.ymssp.2010.01.009.
- [23] J.L. Almazan, G. Espinoza, J.J. Aguirre, Torsional balance of asymmetric structures by means of tuned mass dampers. ” *Engineering Structures*, 42 (2012), 308–328, doi:10.1016/j.engstruct.2012.04.034.
- [24] Daniel Y., and O. Lavan, Gradient based optimal seismic retrofitting of 3D irregular buildings using multiple tuned mass dampers, *Computers and Structures*, 139 (2014), 84-97, doi:10.1016/j.compstruc.2014.03.002.
- [25] NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Edition, *Report No: FEMA 450-I*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, 2003.
- [26] J.K. Whittle, M.S. Williams, T.L. Karavasilis, A. Blakeborough, “A comparison of viscous damper placement methods for improving seismic building design”, *J of Earthquake Engineering*, 16 (2012), 540-560, doi:10.1080/13632469.2011.653864.
- [27] Hoanga. N, .Fujinoa Y. and Warnitchai P, Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas, *Engineering Structures*, 30 (2008), 707–715, doi:/10.1016/j.engstruct.2007.05.007.
- [28] E. Aydın, A Simple Damper Optimization Algorithm For Both Target Added Damping Ratio And Interstorey Drift Ratio”, *Earthquakes and Structures*, 5 (2013), pp 083-109, doi:10.12989/eas.2013.5.1.083.
- [29] Wolfram Research, Mathematica Edition, Version 8.0, *Wolfram Research, Champaign, Illinois*, 2012.